

УДК 621.32

## ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАМП ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Кандидаты техн. наук, доценты КОЗЛОВСКАЯ В. Б., РАДКЕВИЧ В. Н.,  
инж. КОЛОСОВА И. В.

*Белорусский национальный технический университет*

Для электрического освещения помещений, зданий и наружных территорий применяются лампы накаливания, газоразрядные лампы низкого давления (ГЛНД) и газоразрядные лампы высокого давления (ГЛВД). При выборе источника света в первую очередь учитывают такие характеристики ламп, как номинальная мощность  $P_{\text{ном}}$ , световой поток  $\Phi$ , световая отдача  $H$  и срок службы  $T$ . Значения этих показателей приводятся в справочной литературе при номинальном подведенном напряжении. Однако даже при неизменной величине напряжения на шинах источника питания далеко не все световые приборы работают при номинальном напряжении, так как имеет место потеря напряжения в электрических сетях. Следовательно, фактические характеристики источников света могут отличаться от указанных в справочной литературе, что сказывается на результатах расчета расхода электроэнергии. К сожалению, в технической литературе приводится информация о влиянии напряжения на некоторые технические характеристики отдельных типов источников света, которая в разных источниках может не совпадать и даже быть противоречивой.

Цель данной статьи – анализ и систематизация информации о влиянии величины напряжения на показатели электропотребления и эксплуатационные характеристики различных ламп с учетом требований действующей нормативно-технической документации.

Как известно, все электроприемники, в том числе и световые приборы, обладают регулирующим эффектом нагрузки, под которым понимается изменение потребляемой мощности в процентах при изменении напряжения на 1 %. Зависимость потребляемых активной  $P$  и реактивной  $Q$  мощностей электроприемников от напряжения называется статической характеристикой электрической нагрузки по напряжению. В соответствии с действующим ГОСТ 13103–97 [1] установившееся отклонение напряжения (%) определяется по формуле

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $U_y$  – усредненное значение напряжения в рассматриваемой точке сети;  
 $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение сети.

Нормально допустимые и предельно допустимые значения  $\delta U_y$  на вы-  
 водах электроприемников равны соответственно  $\pm 5$  и  $\pm 10$  % [1].

Для ламп накаливания статическая характеристика активной нагрузки  
 выражается степенной функцией [2–5]

$$P = P_{\text{ном}} \left( \frac{U_y}{U_{\text{ном}}} \right)^m, \quad (2)$$

где  $m$  – показатель, характеризующий регулирующий эффект нагрузки  
 освещения.

В литературных источниках приводятся разные значения показателя  $m$ :  
 1,53 [2]; 1,58 [3]; 1,6 [4, 5]. Однако это несущественно влияет на результа-  
 ты расчета, так как при отклонении напряжения от номинального в преде-  
 лах  $\pm 10$  % они различаются не более чем на 5 %. Поэтому примем для ламп  
 накаливания значение  $m = 1,58$ .

Из формулы (1) имеем

$$U_y = U_{\text{ном}} + \frac{\delta U}{100} U_{\text{ном}}. \quad (3)$$

Подставив выражение (3) в (2), получим

$$P = P_{\text{ном}} \left( 1 + \frac{\delta U_y}{100} \right)^m. \quad (4)$$

Тогда величина, на которую изменяется потребление активной мощно-  
 сти ламп накаливания в процентах от  $P_{\text{ном}}$ , вычисляется по формуле

$$\delta P = \left[ \left( 1 + \frac{\delta U_y}{100} \right)^m - 1 \right] \cdot 100. \quad (5)$$

Статические характеристики нагрузок газоразрядных источников света  
 определяются с учетом применяемых пускорегулирующих аппаратов  
 (ПРА). Поэтому регулирующий эффект нагрузки для одного и того же типа  
 лампы в зависимости от ПРА может быть разным. Для люминесцентных  
 ламп низкого давления и ГЛВД типа ДРИ при использовании электромаг-  
 нитных ПРА статическая характеристика активной нагрузки может быть  
 представлена в виде линейной зависимости [3, 6]

$$P = P_{\text{ном}} \left( 1 + \frac{m(U_y - U_{\text{ном}})}{U_{\text{ном}}} \right), \quad (6)$$

где  $m$  – расчетный коэффициент, значение которого принимается равным:  
 2 – для люминесцентных ламп низкого давления; 2,2 – для ламп типа ДРИ.

С учетом выражения (3) статическая характеристика (6) имеет вид

$$P = P_{\text{ном}} \left( 1 + \frac{m\delta U_y}{100} \right). \quad (7)$$

Процентное изменение электропотребления осветительными установками с ГЛНД и лампами типа ДРИ в зависимости от величины отклонения напряжения вычисляется по формуле

$$\delta P = m\delta U_y. \quad (8)$$

Из газоразрядных источников света высокого давления на производственных предприятиях наиболее широкое распространение получили лампы типа ДРЛ. Для этих ламп в (в комплекте с ПРА) статическая характеристика активной нагрузки имеет вид [3, 7]

$$P = P_{\text{ном}} \left( 2,43 \frac{U_y}{U_{\text{ном}}} - 1,43 \right). \quad (9)$$

Согласно [8] зависимость потребляемой активной мощности от напряжения для ламп типа ДРЛ приближенно может определяться, как и для газоразрядных ламп низкого давления, по выражению (6) при  $m = 2$ . Сопоставляя результаты расчетов по (6) и (9), можно сделать вывод о том, что они отличаются незначительно (не более, чем на 4 %).

Статическую характеристику нагрузки для ламп типа ДРЛ с учетом формулы (3) запишем в виде

$$P = P_{\text{ном}} \left( 1 + \frac{2,43\delta U_y}{100} \right). \quad (10)$$

Величина в процентах, на которую изменяется потребление активной мощности ламп типа ДРЛ в комплекте с ПРА в зависимости от значения отклонения напряжения, определяется по формуле

$$\delta P = 2,43\delta U_y. \quad (11)$$

Количественная оценка увеличения или уменьшения потребления электроэнергии осветительными установками с разными типами ламп при отклонении напряжения от номинального производится по выражениям, аналогичным (5), (8) и (11).

На рис. 1 представлены графические зависимости, отражающие изменение потребления активной мощности (электроэнергии), при отклонении подведенного напряжения в диапазоне  $\pm 10$  % от номинального значения для разных источников света. Как видно из рис. 1, наибольшим регулирующим эффектом по активной мощности обладают газоразрядные лампы высокого давления типа ДРЛ и ДРИ.

Световой поток источника света зависит от ряда факторов, в том числе и от величины напряжения, подведенного к световому прибору. Для ламп накаливания эта зависимость имеет вид [2, 5]

$$\Phi = \Phi_{\text{ном}} \left( \frac{U_y}{U_{\text{ном}}} \right)^n, \quad (12)$$

где  $\Phi_{\text{ном}}$  – световой поток источника света при номинальном напряжении, люмен (ЛМ).

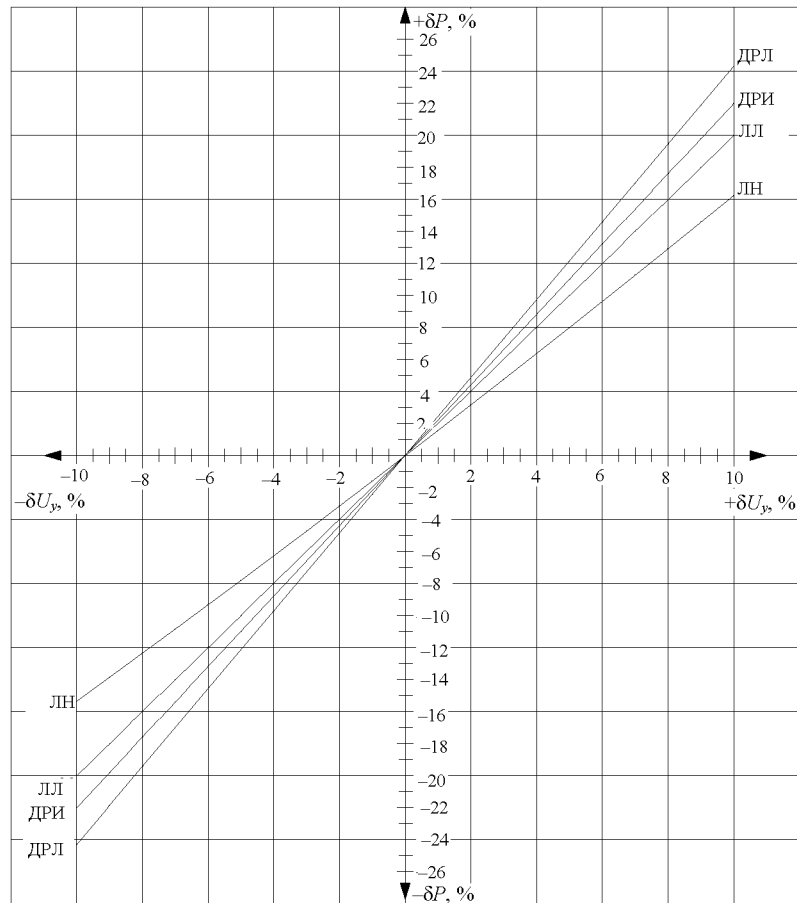


Рис. 1. Изменение потребления активной мощности различными типами источников света при отклонении напряжения

Значения показателя степени  $n$  в литературных источниках несколько различаются: 3,6 [5, 8]; 3,67 [2]. Учитывая (3), формулу (12) представим как

$$\Phi = \Phi_{\text{ном}} \left( 1 + \frac{\delta U_y}{100} \right)^n. \quad (13)$$

Уменьшение светового потока при отрицательных значениях  $\delta U_y$  и увеличение – при положительных, выраженное в % от номинального значения, определяется следующим образом:

$$\delta \Phi = \left[ \left( 1 + \frac{\delta U_y}{100} \right)^n - 1 \right] \cdot 100. \quad (14)$$

Расчеты по формуле (14) при  $n = 3,6$  и  $3,67$  показывают, что при изменении  $\delta U_y$  в предельно допустимом диапазоне результаты отличаются не более чем на 3 %. Поэтому в расчетах можно принять значение  $n = 3,6$ .

Для ГЛНД и ГЛВД зависимость светового потока от напряжения выражается формулой [6, 8]

$$\Phi = \Phi_{\text{ном}} \left( 1 + \frac{n(U_y - U_{\text{ном}})}{U_{\text{ном}}} \right), \quad (15)$$

где  $\Phi_{\text{ном}}$  – световой поток источника света при номинальном напряжении, лм;  $n$  – расчетный коэффициент, значение которого принимается равным 1,5 – для ГЛНД; 2,5 – для ламп типа ДРЛ; 3,0 – для ламп типа ДРИ.

С учетом (3) выражение (15) имеет вид

$$\Phi = \Phi_{\text{ном}} \left( 1 + \frac{n\delta U_y}{100} \right). \quad (16)$$

Изменение светового потока газоразрядной лампы при отклонении подведенного напряжения от номинального значения определяется по формуле

$$\delta\Phi = n\delta U_y. \quad (17)$$

На рис. 2 показано, как изменяется световой поток в зависимости от отклонения напряжения для различных типов электрических ламп. Из рис. 2 следует, что в максимальной степени величина напряжения влияет на световой поток ламп накаливания.

Экономичность источника света оценивается с помощью световой отдачи, которая рассчитывается по формуле

$$H = \frac{\Phi}{P}. \quad (18)$$

Подставив (12) и (2) в формулу (18), получим выражение световой отдачи при напряжении  $U_y$  для ламп накаливания

$$H = H_{\text{ном}} \left( \frac{U_y}{U_{\text{ном}}} \right)^{n-m}, \quad (19)$$

где  $H_{\text{ном}}$  – световая отдача лампы при номинальном напряжении, лм/Вт.

При известном значении отклонения напряжения на зажимах светильника

$$H = H_{\text{ном}} \left( 1 + \frac{\delta U_y}{100} \right)^{n-m}. \quad (20)$$

Изменение световой отдачи (%) в зависимости от величины отклонения напряжения для ламп накаливания

$$\delta H = \left[ \left( 1 + \frac{\delta U_y}{100} \right)^{n-m} - 1 \right] \cdot 100. \quad (21)$$

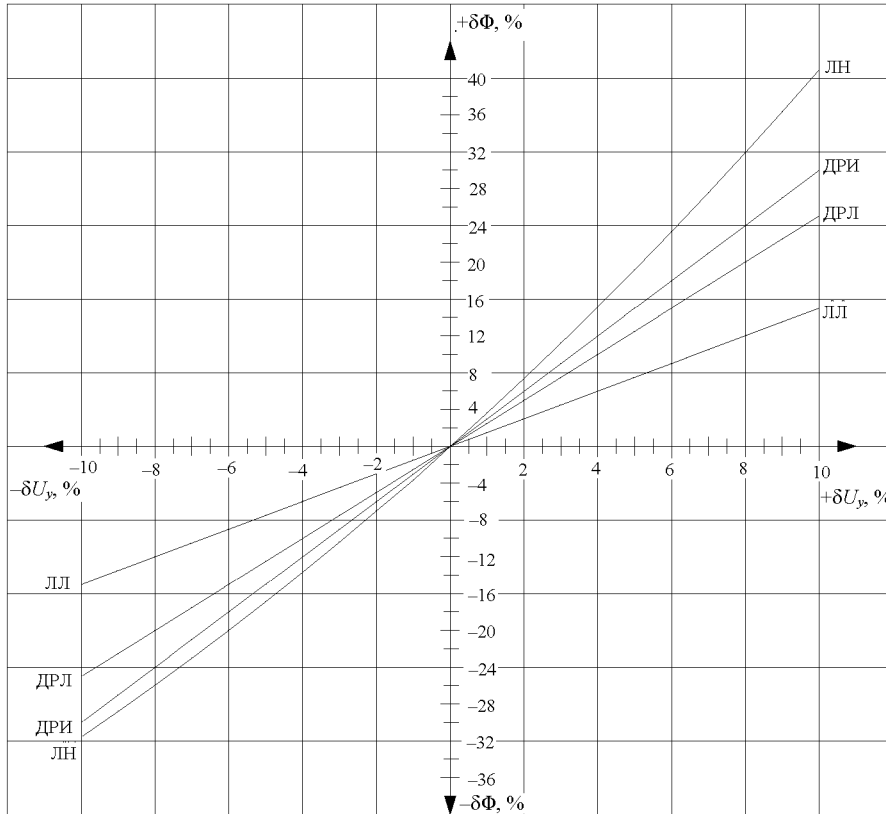


Рис. 2. Изменение светового потока различных типов источников света при отклонении напряжения

Для люминесцентных ламп низкого давления и ламп типа ДРИ выражение световой отдачи в зависимости от величины напряжения выводится путем подстановки (15) и (6) в (18). После выполнения некоторых математических преобразований получаем следующую формулу:

$$H = H_{\text{ном}} \left( \frac{nU_y + (1-n)U_{\text{ном}}}{mU_y + (1-m)U_{\text{ном}}} \right). \quad (22)$$

При расчете по выражению (22) для ГЛНД принимают  $n = 1,5$  и  $m = 2$ , а для ГЛВД типа ДРИ –  $n = 3$  и  $m = 2,2$ .

С учетом формулы (3) после преобразования соотношения (22) получим

$$H = H_{\text{ном}} \frac{1 + \frac{ndU}{100}}{1 + \frac{mdU}{100}} \quad (23)$$

Изменение световой отдачи ГЛНД и ламп типа ДРИ, выраженное в процентах, при отклонении напряжения от номинального значения на величину  $\delta U$  рассчитывается по формуле

$$\delta H = \left( \frac{1+n \frac{\delta U}{100}}{1+m \frac{\delta U}{100}} - 1 \right) \cdot 100. \quad (24)$$

Для ГЛВД типа ДРЛ с использованием выражений (15) и (9) световая отдача определяется как

$$H = H_{\text{ном}} \left( \frac{2,5U_y - 1,5U_{\text{ном}}}{2,43U_y - 1,43U_{\text{ном}}} \right). \quad (25)$$

С учетом (3) после преобразования формулы (25) получим

$$H = H_{\text{ном}} \left( \frac{1 + \frac{2,5\delta U_y}{100}}{1 + \frac{2,43\delta U_y}{100}} \right). \quad (26)$$

Величина, на которую изменяется световая отдача лампы типа ДРЛ при повышении или понижении подведенного напряжения, определяется по формуле

$$\delta H = \left( \frac{1 + 2,5 \frac{\delta U_y}{100}}{1 + 2,43 \frac{\delta U_y}{100}} - 1 \right) \cdot 100. \quad (27)$$

Рис. 3 дает графическое представление об изменении световой отдачи ламп при отклонении напряжения в электрической осветительной сети в диапазоне  $\pm 10\%$  от номинального значения. Для ламп типа ДРЛ световая отдача практически не меняется при изменении подведенного напряжения. Как показали расчеты, при увеличении напряжения на  $10\%$  световая отдача лампы также увеличивается на  $0,56\%$ , а при снижении напряжения на  $10\%$  – уменьшается на  $0,93\%$ .

Упростив выражения (5), (8), (11), (14), (17), (21), (24), (27) и подставив в них принятые значения расчетных коэффициентов, получим формулы для оценки изменения потребляемой активной мощности, светового потока и световой отдачи для различных источников света в зависимости от отклонения питающего напряжения (табл. 1).

Величина напряжения оказывает влияние на срок службы электрических источников света. Согласно ГОСТ 2239–79 для ламп накаливания зависимость продолжения горения  $T$  от напряжения определяется следующим выражением:

$$T = T_{\text{л}} \left( \frac{U_{\text{л}}}{U_y} \right)^n, \quad (28)$$

где  $T_{\text{л}}$  – продолжительность горения при заданном напряжении лампы  $U_{\text{л}}$ ;  $n$  – показатель, равный  $13$  – для вакуумных ламп и  $14$  – для газополных ламп.

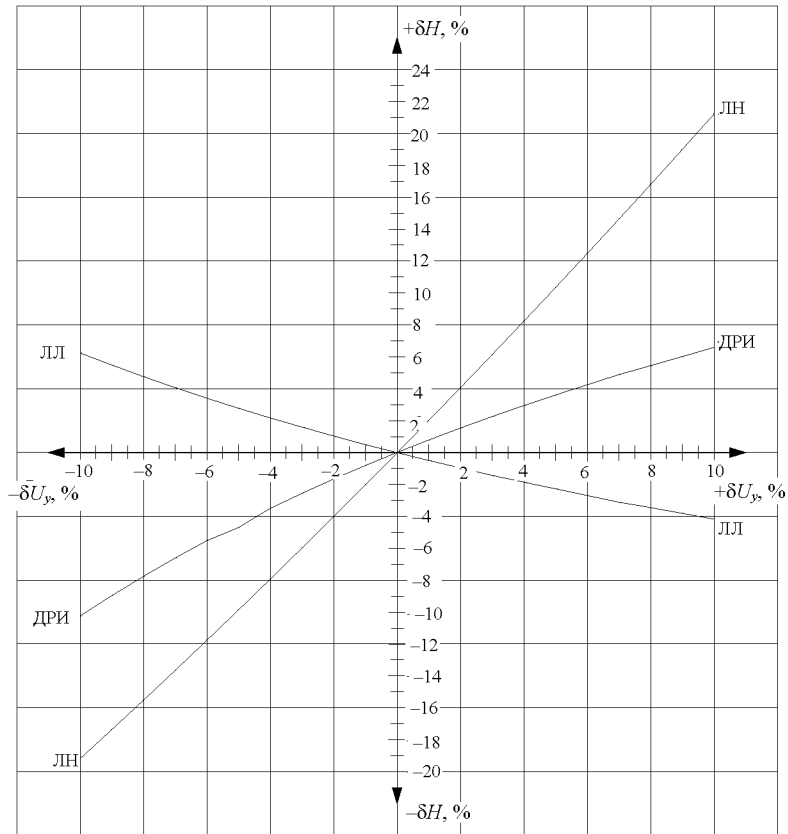


Рис. 3. Изменение световой отдачи различных типов источников света при отклонении напряжения

Таблица 1

**Аналитические выражения, отражающие изменения характеристик источников света при отклонении напряжения**

Тип источника света	Зависимость изменения параметра от отклонения напряжения, %		
	Потребляемая активная мощность	Световой поток	Световая отдача
Лампа накаливания	$\delta P = ((1 + 0,01\delta U_y)^{1,58} - 1) \cdot 100$	$\delta \Phi = ((1 + 0,01\delta U_y)^{3,6} - 1) \cdot 100$	$\delta H = ((1 + 0,01\delta U_y)^{2,02} - 1) \cdot 100$
ГЛНД	$\delta P = 2\delta U_y$	$\delta \Phi = 1,5\delta U_y$	$\delta H = \frac{0,58\delta U_y}{1 + 0,02\delta U_y}$
ДРЛ	$\delta P = 2,43\delta U_y$	$\delta \Phi = 2,5\delta U_y$	$\delta H = \frac{0,78\delta U_y}{1 + 0,0243\delta U_y}$
ДРИ	$\delta P = 2,2\delta U_y$	$\delta \Phi = 3\delta U_y$	$\delta H = \frac{0,88\delta U_y}{1 + 0,022\delta U_y}$

Отметим, что при  $U_y > 1,1U_n$  происходит резкое снижение продолжительности горения ламп накаливания.

Для газоразрядных ламп в литературных источниках дается противоречивая информация о сроке службы ламп в зависимости от напряжения сети. Например, в [6] отмечается, что срок службы люминесцентных ламп



низкого давления изменяется на 1,5–3 %, а типа ДРЛ – на 3,5 % в противоположную сторону на каждый процент изменения напряжения питания. Информации, касающейся срока службы ламп типа ДРИ, не имеется, так как их эксплуатационные характеристики недостаточно изучены.

Согласно [3, 8, 9] срок службы люминесцентных ламп и ламп типа ДРЛ сокращается как при положительных, так и при отрицательных отклонениях напряжения. В среднем при  $\delta U = \pm 10\%$  срок службы люминесцентных ламп сокращается на 20–25 % [3]. Продолжительность горения газоразрядных ламп снижается при частых включениях и отключениях. Таким образом, для газоразрядных ламп не установлен единый закон изменения срока службы в зависимости от величины напряжения.

## ВЫВОДЫ

1. Проанализированы зависимости потребляемой активной мощности, светового потока и световой отдачи для ламп накаливания, люминесцентных ламп низкого давления и газоразрядных ламп высокого давления типа ДРЛ и ДРИ. Получены аналитические и графические зависимости, позволяющие оценивать, насколько изменяются эксплуатационные характеристики ламп при отклонении напряжения от номинального значения, что может использоваться на практике.

2. В максимальной степени отклонение напряжения влияет на электропотребление ламп типа ДРЛ, световой поток и световую отдачу ламп накаливания.

3. Наиболее изучены эксплуатационные характеристики ламп накаливания. Для газоразрядных ламп изменение продолжительности горения в зависимости от отклонения напряжения оценивается весьма приблизительно. Данные об эксплуатационных характеристиках некоторых типов газоразрядных ламп в литературе отсутствуют.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н о р м ы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109–97.
2. Б у д з к о, И. А. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов / И. А. Будзко, М. С. Левин. – М.: Агропромиздат, 1985. – 320 с.
3. К о з л о в с к а я, В. Б. Электрическое освещение: справ. / В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич, В. Н. Сацукевич. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 255 с.
4. К о н ю х о в а, Е. А. Электроснабжение объектов / Е. А. Конохова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 320 с.
5. С т а б р о в с к и й, Л. Н. Новое направление в создании энергосберегающего электрооборудования / Л. Н. Стабровский // Энергия и Менеджмент. – 2002. – № 1–2. – С. 14–17.
6. А з а л и е в, В. В. Эксплуатация осветительных установок промышленных предприятий / В. В. Азалиев, Г. Д. Варсанюфьева, Ц. Е. Кроль. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 164 с.
7. К у д р и н, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. И. Кудрин, В. В. Прокопчик. – Минск: Вышэйш. шк., 1988. – 357 с.
8. А й з е н б е р г, Ю. Б. Справочная книга по светотехнике / Ю. Б. Айзенберг. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 528 с.
9. Р о х л и н, Г. Н. Разрядные источники света / Г. Н. Рохлин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 719 с.